第47卷 第3期
2024年3月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 47 No. 3
Mar. 2024

垄沟覆盖集雨模式对玉米根际土壤微生物多样性的影响

高彦婷[1]， 张 芮[1]， 董 博[2]， 李青青[1]， 刘柯含[1]

（1. 甘肃农业大学水利水电工程学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃省农业科学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：为明确垄沟覆盖集雨模式对玉米根际土壤微生物群落结构及多样性的影响，选取“登义”2号为试验材料，采用单因素完全随机试验设计，以常规平栽不覆盖为对照（CK），依次设置垄覆普通黑色地膜沟不覆盖（HL）、垄覆液态地膜沟不覆盖（YL）、垄不覆盖沟覆秸秆（NJ）、垄覆液态地膜沟覆秸秆（YJ）、垄覆普通黑色地膜沟覆秸秆（HJ）共计6个处理，利用Illumina高通量测序技术分析土壤微生物群落构成及多样性。结果表明：（1）垄覆膜沟覆秸秆的集雨模式均有利于玉米增产、提高水分利用效率，其中HJ处理的穗行数、千粒重、产量及水分利用效率均最大，分别较对照CK提高11.22%、31.31%、88.02%、79.83%，且与CK间差异均显著（P<0.05），而垄无覆盖沟覆秸秆的NJ处理的产量及水分利用效率均较CK低。（2）垄覆地膜各处理均能显著提高微生物群落多样性，且能改变微生物结构，但垄无覆盖沟覆秸秆的NJ处理却不能。（3）各处理的微生物群落组成在门、纲水平上均受到覆盖集雨模式的影响。土壤微生物群落中主要优势菌门为变形菌门（Proteobacteria）、酸杆菌门（Acidobacteria）、芽单胞菌门（Gemmatimonadetes）和拟杆菌门（Bacteroidetes）；主要优势菌纲为γ-变形菌纲（Gammaproteobacteria，占比25.8%）、拟杆菌纲（Bacteroidia，占比8.4%）和α-变形菌纲（Alphaproteobacteria，占比7.7%），且垄沟覆盖有助于提高土壤微生物丰富度、多样性和均匀度指数，即垄沟集雨模式可通过改变土壤微生物门、纲水平的结构及组成，实现玉米增产的效果。

关 键 词：垄沟集雨；玉米；土壤微生物群落；覆盖

文章编号：1000－6060(2024)03－0413－11(0413～0423)

西北黄土高原半干旱区在中国旱作农业生产中占有重要地位[1]，旱地玉米是该区农业主要产业[2]。该区地下水位深，降水季节分配不均，缺水和季节性干旱是制约旱地玉米发展的主要瓶颈之一[3-4]。研究如何有效保蓄自然降水、科学合理灌溉是破解旱区玉米生产中降水在生育期与需水期存在严重时序错位难题的关键[5]。垄沟覆盖集雨栽培技术，主要采用田间沟垄相间排列、沟内种植作物、垄上覆膜的方式来减少并收集由于无效降雨所产生的地表径流，有效降低地表无效蒸发，增加农田及作物根域土壤含水量，延长作物水分利用期，进而实现提高作物产量和水分利用效率[6-11]的目标。该技术作为我国半干旱雨养农业区一种行之有效的高效节水农业措施，在农业生产中发挥着重要作用[12-13]。

地表覆盖（地膜、秸秆等）可人为改善农田微气候，为作物根际提供适宜的水热条件。地膜覆盖的保墒与增温作用，能显著增加作物产量和水分利用效率[14-15]，但长期覆盖普通地膜，因其不易降解、阻碍土壤水分入渗、影响作物根系生长，导致农田生态系统污染严重[16]，可降解膜的出现解决了农田残膜污染问题。秸秆覆盖可提供充足的养分刺激土壤微生物活性[17]，增加土壤微生态系统的生物多样性[18]。土壤微生物在农业生态系统的养分循环和结构维持中起着重要作用[19]，其多样性涉及土壤内部物质和能量循环[20]。研究表明，地膜覆盖可改善土壤微生物种群[21]，改变细菌[22]和真菌[23]结构，提

收稿日期：2023-08-16； **修订日期**：2023-10-23

基金项目：甘肃省高等学校创新基金项目（2021B-139）；甘肃农业大学青年导师基金（GSAU-QDFC-2018-06）；甘肃农业大学伏羲青年英才项目（Gaufx-03Y10）；水利工程学科干旱灌区节水灌溉与水资源调控创新团队资助

作者简介：高彦婷（1983-），女，在读博士，副教授，主要从事节水灌溉与水资源利用研究. E-mail: 152140111767@163.com

通讯作者：张芮（1980-），男，博士，教授，主要从事节水灌溉与水资源利用研究. E-mail: zhr_1029@163.com

高变形菌门(Proteobacteria)和酸杆菌门(Acidobacteria)相对丰度[24]。目前,垄沟集雨覆盖栽培技术的研究主要集中在土壤理化性质[25-28]、养分含量[29]、生物化学过程[30-31]、光合特性[32-33]、水分利用[34]、产量[35]等方面,而土壤微生物群落对垄沟覆盖响应的研究鲜有报道。本实验通过垄沟覆盖集雨种植系统下的玉米田间试验,使用高通量测序技术揭示其对玉米根际土壤微生物群落结构的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2019年4—9月在甘肃省定西市灌溉试验站西川试验基地(37°52′N,102°50′E,海拔1958 m)进行。该基地地处黄土高原西部丘陵区,年均气温6.3 ℃,太阳辐射592 kJ·cm^{-2}·a^{-1},年日照时长2409 h,≥10 ℃积温2075.1 ℃,无霜期141 d,作物一年一熟,属典型的半干旱雨养农业区。多年年均降雨量400 mm,且主要集中在6—9月(占年降水量的68%),潜在蒸散发量1500 mm,空气相对湿度65.8%。试验地土壤为黄绵土,平均孔隙率55%,体积比田间持水量23.7%,土壤平均容重1.51 g·cm^{-3},有机质含量1.0%~1.5%,碱解氮32.25 mg·kg^{-1},全氮0.86 g·kg^{-1},硝态氮240.62 mg·kg^{-1},铵态氮14.57 mg·kg^{-1},有效磷19.56 mg·kg^{-1},速效钾186.17 mg·kg^{-1},pH值8.71。

1.2 数据来源

1.2.1 试验设计 试验供试玉米品种为"登义"2号,采用垄沟覆盖种植技术(图1),垄宽60 cm,沟宽60 cm,垄高25 cm。共设6个处理,3种一元集雨模式:垄覆普通黑色地膜沟不覆盖(HL)、垄覆液态地膜沟不覆盖(YL)、垄不覆盖沟覆秸秆(NJ);2种二元集雨模式:垄覆液态地膜沟覆秸秆(YJ)、垄覆普通黑色地膜沟覆秸秆(HJ);以传统平作不覆盖(CK)为对照。每个处理3个重复,共计18个小区,随机布设。播种前施肥1次,整个生育期内不灌水、不施肥,人工除草3次,避免破坏地膜。

1.2.2 土壤样品采集 各处理随机选取3株长势一致的玉米,在每株沟侧靠近根系处,去除土壤表层杂质,用外径4 cm土钻钻取深度30 cm左右处土壤样品,同处理3个测点土样混匀后,去除可见根、杂草、石块等,分2份:一份过2 mm筛后装入无菌密封袋中,用冰盒低温保存快速带回实验室,于-80 ℃冰箱保存用于高通量测序;另一份过1 mm筛风干后测土壤理化性质。

1.2.3 玉米产量及相关指标 收获时统计各小区玉米有效穗数,并于每小区选取代表性植株6株取其穗样,风干后考种,观测记录其穗长、穗粗、穗行数、行粒数、穗粒重及千粒重。

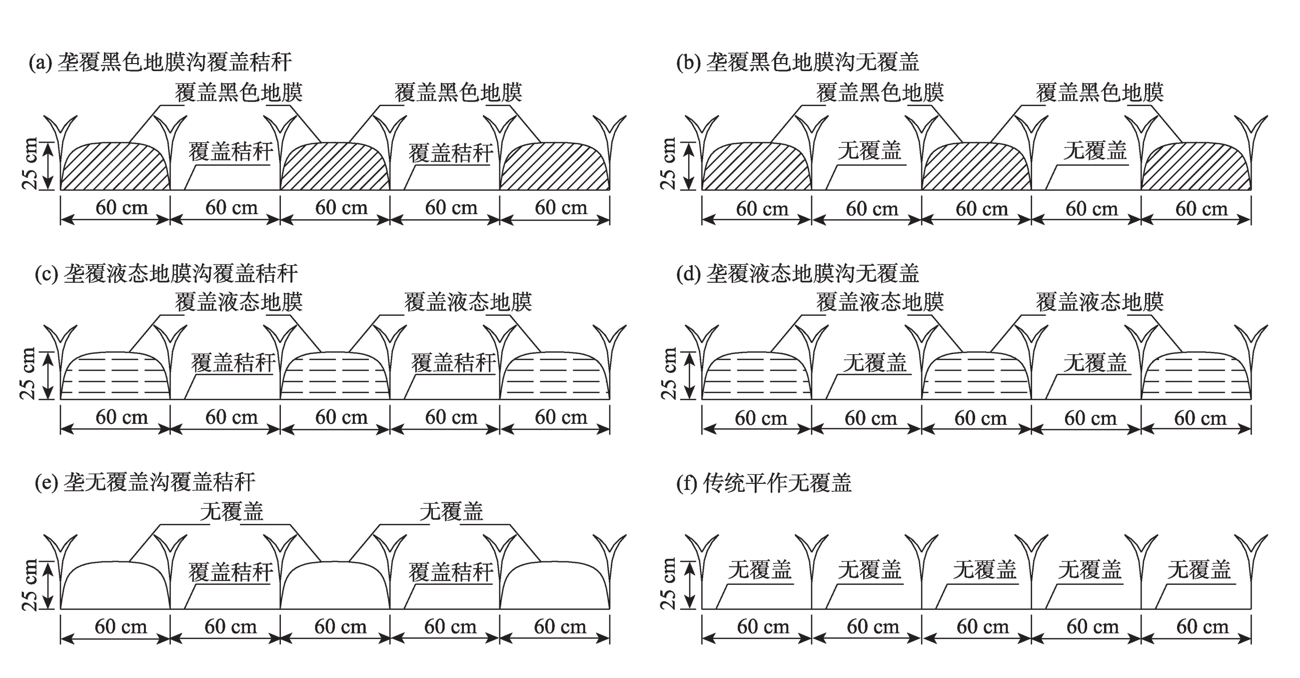


图1 垄沟覆盖种植模式

Fig. 1 Ridge mulch planting patterns

1.2.4 土壤含水率的测定 每个试验小区分别在同一沟沟内靠前、中、后位置离玉米根横向距离5~10 cm处各选取1个测点，在纵深分别为10 cm、20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm处取样，同一小区3点同一深度测值取平均值。雨前、雨后及生育期转变时加测，用烘干法采用烘箱（型号：DHG-9036A）在105 ℃下烘8 h测定。

1.2.5 地温的测定 在每个小区沟侧中部离玉米植株根部10 cm处并排布设一组地温计，测量深度依次为5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm。地温读数每隔2 h读1次，读取时间分别为08:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00。

1.2.6 水分利用效率 水分利用效率（WUE）计算公式如下：

$$WUE = Y/ET \quad (1)$$

式中：Y为玉米产量（kg）；ET为全生育期耗水量（mm），用土壤含水率估算，依据《灌溉试验规范》（SL13-2004）规定，经简化计算公式如下：

$$ET_{1-2} = 10\sum_{i=1}^{n}\gamma_i H_i(\delta_{i1} - \delta_{i2}) + I + P + K - C \quad (2)$$

式中：ET_{1-2}为阶段需水量（mm）；γ_i为第i层的土壤干体积质量（$g \cdot cm^{-3}$）；H_i为第i层的土壤厚度（cm）；δ_{i1}、δ_{i2}分别为第i层土壤在计算时段始末的质量含水率；I、P、K、C分别为时段内灌水量、降雨量、地下水补给量和排水量（地表排水与下层排水之和）（mm）。其中，试验区地下水埋深大于20 m，故K取0；试验区属干旱区，且试验中全区均不灌水，即I取0；且本试验地是平地，周围也无河流，未发生径流，故C按0计。降雨量采用试验基地小型气象站观测的降雨数据。

1.3 研究方法

1.3.1 土样高通量测序 采用CTAB方法提取土壤基因组DNA[36]，然后利用琼脂糖凝胶电泳检测DNA的纯度和浓度[37]，取适量DNA用无菌水稀释，以稀释后的基因组DNA为模版使用带Barcode的特异引物对16S rDNA的V4区进行PCR扩增，扩增引物为515F（5′-GTGCCAGCMGCCGCGGTAA-3′）和806R（5′-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3′）[38]。土壤DNA的提取及16S rDNA扩增子测序工作委托北京诺禾致源科技股份有限公司完成。

1.3.2 数据统计及处理 玉米田间根际土壤样品通过Illumina NovaSeq机器测定得到下机数据（PE read）后，拼接得到Raw Tags，然后过滤低质量和短长度的序列得到Clean Tags，最后过滤嵌合体得到用于后续分析[39]的Effective Tags。每个土壤样品的序列数介于59878和67957之间，平均64044个。序列长度平均为253 bp。各样品数据有效率皆大于67%，且有效数据中质量大于Q20、Q30的数据占比均高于97%。测序数据在诺禾致源售后工具平台（https://magic.novogene.com/）完成处理：首先利用Uparse软件（Version 7.0.1001）以97%的一致性将有效数据（Effective Tags）聚类成为最小分类操作单元（OTU），然后用Mothur方法与SILVA132的SSUrRNA数据库对代表OTU进行物种注释分析，再在各分类水平上统计各样本的群落组成，之后使用Qiime软件（Version 1.9.1）计算OTU、丰富度指数（Chao1）、辛普森指数（Simpson）和香浓指数（Shannon）等α多样性指数等，并基于距离分别进行主成分分析（PCA）和无度量多维标定（NMDS）等β多样性分析[36]。使用SPSS Statistics 19.0软件进行数据处理和方差分析，并使用Origin 2022软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 不同集雨模式对玉米产量及产量性状的影响

表1列出了不同集雨模式下玉米产量及产量性状。各处理中，玉米穗长、穗粗、行粒数间均无显著性差异（$P<0.05$）。但垄覆同种材料时，沟不覆秸秆处理的行粒数均不小于沟覆秸秆的处理，可能是因为覆秸秆处理的玉米过早进入灌浆期致使孕穗期缩短，有些籽粒未来得及灌浆造成。处理HJ的穗行数和千粒重均最大，CK均最小。处理HJ、NJ穗行数间无显著性差异，较CK分别增加11.22%、9.16%，均与CK差异显著（$P<0.05$），但其余各处理间以及与处理HJ、NJ及CK间均无显著性差异。各处理千粒重排序由高到低依次为：HJ>YJ>YL>HL>NJ>CK。处理HJ、YJ、YL、HL千粒重间差异不显著，较CK分别增加31.31%、30.21%、28.74%、26.33%，且均显著大于CK与处理NJ（$P<0.05$），但处理NJ与CK间差异不显著。考虑因为处理NJ与CK未覆膜，播种后温度较低导致出苗晚，而灌浆期时受气温降低的影响，灌浆不充分致使千粒重小于其他覆盖处理。而垄覆同种材料下，沟覆秸秆的处理均大于沟无覆盖的处理。即垄覆膜、沟覆秸秆均有利于玉米千粒重

表1 不同集雨模式下玉米产量及产量性状

Tab. 1 Yield and yield characters of maize under different rainfall collection modes

处理	穗长/cm	穗粗/cm	穗行数	行粒数	千粒重/g	产量/kg·hm^{-2}
HL	25.76±1.26a	5.31±0.27a	14.56±0.87ab	41.39±0.96a	415.88±19.70a	8525.00±1411.42ab
YL	25.42±1.77a	5.43±0.07a	14.56±0.16ab	41.39±2.01a	423.81±9.66a	9141.75±1227.94ab
NJ	26.53±0.27a	5.27±0.36a	14.89±0.42a	42.17±0.71a	334.95±41.99b	5112.88±228.41c
YJ	25.51±1.26a	5.37±0.11a	14.56±0.16ab	40.39±1.61a	428.67±16.44a	8257.03±437.33b
HJ	26.14±0.51a	5.40±0.05a	15.17±0.14a	40.06±0.68a	432.30±2.01a	10613.50±1380.44a
CK	25.58±0.47a	5.36±0.03a	13.64±0.27b	41.21±1.22a	329.21±32.39b	5644.77±565.37c

注：HL、YL、NJ、YJ、HJ、CK分别表示垄沟覆盖模式为：垄覆普通黑色地膜沟不覆盖、垄覆液态地膜沟不覆盖、垄不覆盖沟覆秸秆、垄覆液态地膜沟覆秸秆、垄覆普通黑色地膜沟覆秸秆及传统平作不覆盖；同列数据后不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下同。

的累积。

各处理产量排序由高到低依次为：HJ>YL>HL>YJ>CK>NJ，且处理YL、HL的产量均与处理HJ差异不显著，但均显著高于处理NJ和CK。其中处理HJ的产量较CK提高88.02%，达到10613.5 kg·hm^{-2}。垄覆液态膜的条件下，沟覆秸秆的处理YJ产量反而小于沟无覆盖的处理YL，分析是因为覆秸秆虽然比不覆秸秆时玉米籽粒饱满，但是由于覆秸秆处理的玉米过早进入灌浆期致使孕穗期缩短，其行粒数较少，导致产量略低。而处理NJ的产量较对照CK反而降低9.4%，究其根本原因是垄沟种植植株密度较平作小，所以平作小区穗数多于垄沟种植，这与胡敏等[40]得出的不覆膜垄沟种植模式的增产效果并不能补偿种植稀疏而造成的减产效应的结论一致。

2.2 不同集雨模式对玉米耗水量和水分利用效率的影响

由表2可见，处理HL耗水量最小，且与其他处理差异显著，处理HJ耗水量次小。沟覆秸秆的处理中，耗水量从大到小依次是处理NJ>YJ>HJ，即垄覆黑色地膜保水性强于垄覆液态膜及不覆膜情况。水分利用效率从大到小依次是处理HJ>HL>YL>YJ>CK>NJ。其中，处理HJ水分利用效率较CK提高了79.83%，且除处理NJ外，其余处理水分利用效率均与CK差异显著（P<0.05），表明垄覆膜处理保水增产效果均优于平地无覆盖情况，但垄不覆膜沟覆秸秆处理NJ水分利用效率较对照CK还小，根本原因是处理NJ因种植密度小于CK导致产量过低，而耗水量又过高。

2.3 不同集雨模式下玉米根际土壤微生物多样性分析

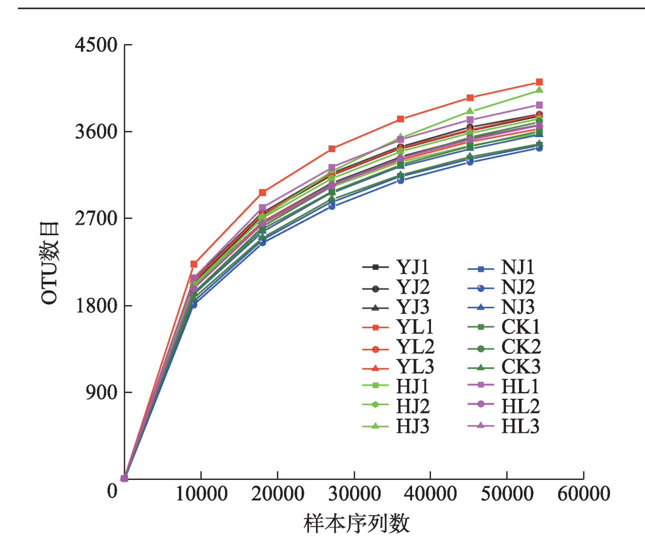
2.3.1 测序结果 稀释曲线是从样本中随机抽取一定测序量的数据，统计其所代表物种数目（即OTU数目），再以抽取的测序数据量与对应的物种数来构建的曲线，是用以描述组内样本多样性的常见曲线，可直接反映测序数据量的合理性，并间接反映样本中物种的丰富程度[41]。

实验对不同集雨覆盖模式下的6个处理的18份土壤样品进行OUT数目统计，并构建稀释曲线评价测序质量，曲线越平缓，说明OUT数目随测序数据的增加呈渐平缓趋势[36]。试验中各组稀释曲线如图2所示，试验前期检出物种数量较大，随测序数据量的增加，样本群落的检出物种丰富度变化逐渐变缓，即所测数据科学合理。

表2 不同集雨模式下玉米耗水特性及水分利用效率

Tab. 2 Water consumption characteristics and water use efficiency of maize under different rainfall collection modes

处理	播种前贮水量/mm	收获后贮水量/mm	降水量/mm	耗水量/mm	水分利用效率/kg·hm^{-2}·mm^{-1}
HL	173.88±12.86d	225.64±4.46a	390.51	338.76±14.12b	25.14±3.98ab
YL	228.44±4.39bc	219.92±13.35a	390.51	399.03±11.29a	22.87±2.63ab
NJ	243.40±9.85ab	222.28±10.98a	390.51	411.63±8.08a	12.42±0.31c
YJ	231.71±6.89bc	223.18±3.74a	390.51	399.04±4.05a	20.70±1.17b
HJ	226.99±2.65c	229.05±10.03a	390.51	388.45±7.39a	27.27±3.09a
CK	226.65±2.43c	212.17±23.39a	390.51	405.00±21.89a	13.98±1.51c



注：YJ1~YJ3表示垄覆液态地膜沟覆秸秆处理的3个重复；YL1~YL3表示垄覆液态地膜沟不覆盖处理的3个重复；HJ1~HJ3表示垄覆普通黑色地膜沟覆秸秆处理的3个重复；NJ1~NJ3表示垄不覆盖沟覆秸秆处理的3个重复；HL1~HL3表示垄覆普通黑色地膜沟不覆盖处理的3个重复；CK1~CK3表示传统平作不覆盖对照处理的3个重复。

图2　稀释曲线（相似度97%水平）

Fig. 2 Rarefaction curve (abundance at 97% similarity level)

2.3.2　*α*多样性分析　在97%一致性阈值下，统计不同样本的*α*多样性分析指数，如表3所示（均一化时选取的数据量cutoff=54179）。各处理样本文库覆盖率均大于98%，表明测序结果有较高可信度，能够反映样本的真实情况。处理YJ、YL、HJ的Shannon指数和Simpson均显著（P<0.05）大于CK，说明垄覆地膜处理可显著提高土壤微生物多样性。各处理的土壤微生物Chao1指数和ACE指数均不存在显著性差异，但处理YJ、YL、HJ、HL的土壤微生物Chao1指数和ACE指数均高于CK，其中处理HJ群落丰富度指数最高；处理NJ丰富度指数小于CK，说明垄覆地膜可提高土壤微生物群落丰富度，而垄不覆膜仅沟覆秸秆会降低微生物群落丰富度，但效果均不显著。处理YL的Observed_species指数为最大值且显著高于NJ，HJ仅次于YL，处理YL、HJ的PD_whole_tree指数均显著大于处理NJ，说明垄覆地膜处理与只沟覆秸秆相比可显著提高土壤微生物群落多样性。

2.3.3　*β*多样性分析　*β*多样性可分析不同样本的微生物群落构成，揭示群落之间的相似性[41]。其中，主成分分析（PCA）应用方差分解对多维数据进行降维分析，从而分析出各处理间群落组成的相似性。从土壤因子中提取前2个主成分因子分析微生物多样性功能（图3a），结果表明，主成分1（PC1）可以解释所有变量方差的9.42%，主成分2（PC2）次之，为8.6%，累计贡献率为18.02%。在PC1轴上，不同处理表现出明显的不同：其中处理YJ、NJ和CK全部分布于正方向上，而HJ多部分布于负方向，说明处理HJ与CK的微生物群落结构存在差异。处理CK、NJ、HL均成簇分布于PC2上轴，说明CK与NJ、HL微生物群落结构相似。而处理YJ、YL和HJ均分布于PC2下轴，说明这3组处理的微生物群落结构都与CK存在差异。

无度量多维标定法（NMDS）是一种非线性模型，使样本的物种信息反映在二维平面上，克服了线性模型[42]诸如PCA、主坐标分析（PCoA）等的缺点。基于OUT水平的NMDS（Stress=0.150）分析（图3b），结果表明，处理CK和NJ均位于横轴（MDS1）的右轴，而处理YJ、YL和HJ均位于MDS1的左轴，说明处理NJ与CK微生物群落结构相似度很高，而与其他处理存在差异。但在纵轴（MDS2）上，各处理间

表3　土壤微生物群落*α*多样性

Tab. 3　*α* diversity metrics of soil microbial communities

处理	样本文库覆盖率	多样性指数		群落丰富度指数		群落多样性指数	
		Shannon	Simpson	Chao1	ACE	Observed_species	PD_whole_tree
YJ	0.987±0.001a	10.03±0.02a	0.998±0.0000a	4161±065a	4216±054a	3739±60ab	217±6ab
YL	0.986±0.002a	10.10±0.20a	0.998±0.0006ab	4296±341a	4351±328a	3838±250a	222±12a
HJ	0.984±0.006a	9.98±0.02a	0.998±0.0006ab	4405±645a	4451±613a	3779±226ab	223±13a
HL	0.986±0.001a	9.98±0.08a	0.997±0.0006bc	4161±143a	4226±135a	3737±122ab	218±9ab
NJ	0.987±0.001a	9.67±0.08b	0.996±0.0006bc	3912±046a	3979±057a	3485±71b	204±2b
CK	0.986±0.002a	9.75±0.14b	0.996±0.0010c	4082±206a	4152±187a	3593±115ab	210±8ab

注：Shannon为香农指数；Simpson为辛普森指数；Chao1指由Chao提出的用Chao1算法估计样本中所含OTU数目的指数；ACE是用来估计群落中含有OTU数目的指数，与Chao算法不同；Observed_species为物种指数；PD_whole_tree为谱系多样性指数，是基于系统发育树来计算的一种多样性指数。

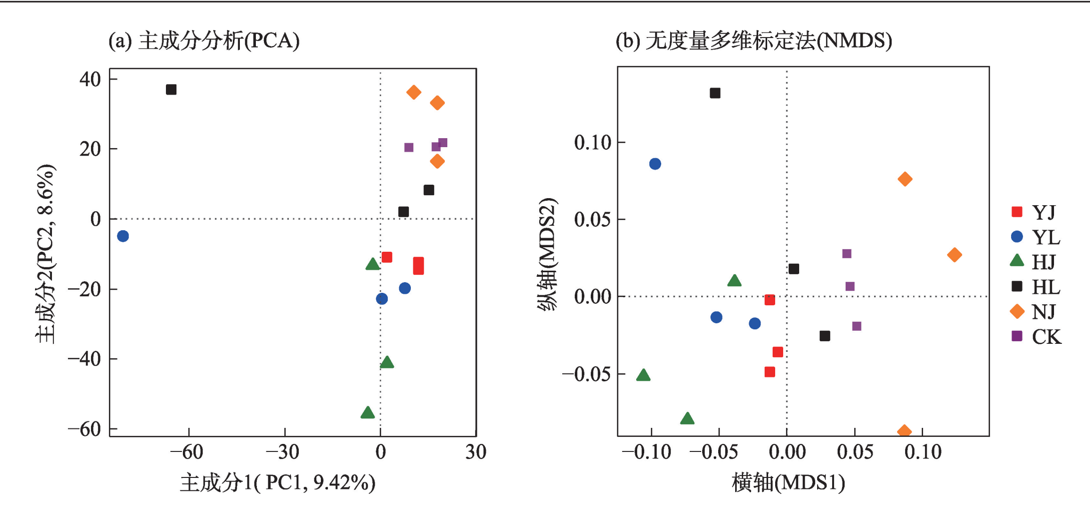


图3 基于OUT水平的多样本比较分析

Fig. 3 Multivariate analysis based on OTU information

差异均不明显。

以上分析表明,处理YJ、YL和HJ均可使土壤微生物群落结构发生改变,处理NJ则基本无变化。

2.4 菌群结构及组成

对各处理样品排名前10的优势菌门相对丰度进行统计分析(图4a)。在不同集雨覆盖下玉米根际土壤中主要菌门有变形菌门、酸杆菌门、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、放线菌门(Actinobacteria)、浮霉菌门(Planctomycetes)、绿弯菌门(Chloroflexi)、疣微菌门(Verrucomicrobia)、厚壁菌门(Firmicutes)、己科河菌门(Rokubacteria)等,其中变形菌门在各处理中的占比分别为33%(YJ)、33%(YL)、33%(HJ)、34%(HL)、39%(NJ)和38%(CK),为垄沟集雨种植下玉米土壤微生物中的优势菌。

纲水平的微生物群落组成如图4b所示。其中,处理CK中主要优势菌纲为γ-变形菌纲(Gammaproteobcteria,占比25.8%)、未命名的芽单胞菌纲(un-

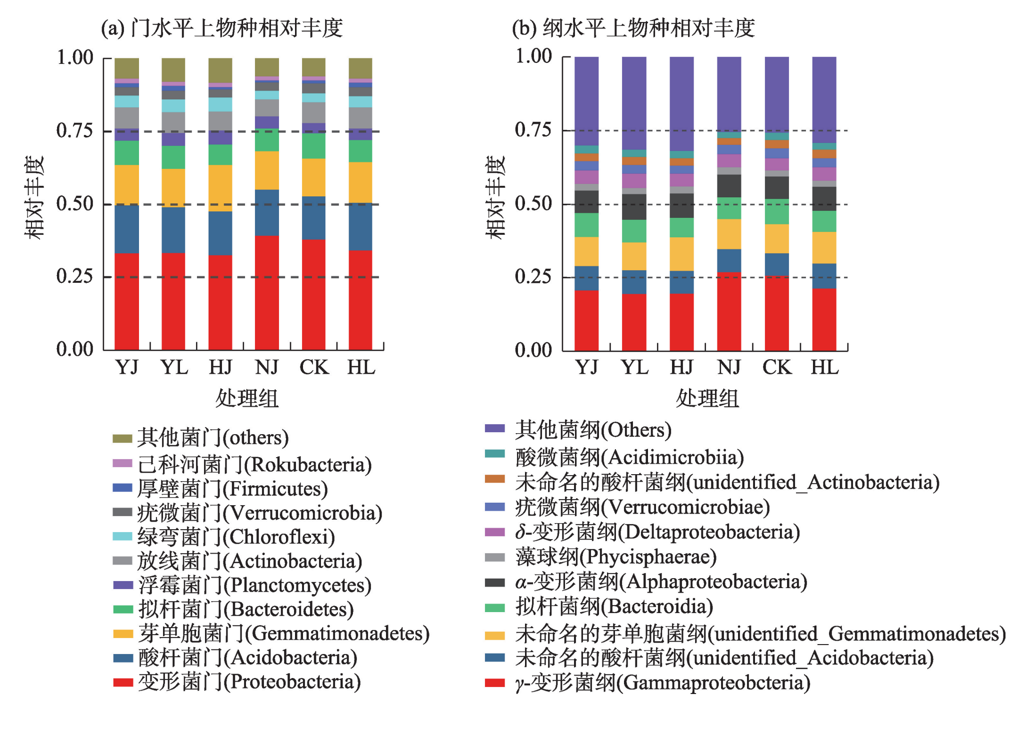


图4 门、纲水平物种相对丰度柱形图

Fig. 4 Species relative abundance histogram at the phylum and class levels

identified_Gemmatimonadetes，9.9%）、拟杆菌纲（Bacteroidia，8.4%）、α-变形菌纲（Alphaproteobacteria，7.7%）、未命名的酸杆菌纲（unidentified_Acidobacteria，7.6%）、δ-变形菌纲（Deltaproteobacteria，4.3%），合计占比达63.7%。与CK相比，处理YJ、YL、HJ和HL中γ-变形杆菌纲丰度分别增加了5.1%、6.2%、6.1%和4.5%，而处理NJ中γ-变形杆菌纲丰度占比减少了1.2%。

2.5 土壤微生物与含水率及温度的相关分析

不同门类细菌与土壤含水率及土壤温度的斯皮尔曼（Spearman）相关系数如表4所示。变形菌门与含水率成显著性负相关，芽单胞菌门与含水率成极显著性负相关，拟杆菌门与含水率和温度均成极显著性负相关，浮霉菌门、绿弯菌门与含水率成显正相关，疣微菌门与含水率成显著性负相关，己科河菌门与温度成极显著性负相关，其他相关性均不显著。

3 讨 论

长期以来，地膜覆盖因其具有增温保墒[43]、保肥[44]、抑制杂草生长[45]、节水增产[46]等作用，在农业种植中被广泛采用。覆盖可为作物生长发育创造适宜的微生态环境[47-48]，因此覆盖对土壤环境的影响也已被广泛研究。然而，就垄覆不同类型地膜结合沟覆秸秆的二元垄沟集雨种植对土壤微生物组成和功能的影响报道较少。为了揭示垄沟集雨种植对于土壤微生物群落的影响，试验通过16S rRNA高通量测序技术分析了二元垄沟集雨种植下玉米的土壤微生物群落的多样性及群落组成。结果表明，垄沟覆盖集雨种植模式可通过影响土壤微生物多样性及其群落结构来改善玉米根际土壤环境。

土壤微生物群落对土壤环境（温度、水分和营养状况等）具有高度敏感性，土壤环境的改变可能会导致某些微生物群落成为主导，而抑制其他微生物，从而导致群落组成和结构的变化。因此，不同的微生物群落以不同的方式对气候特征、土壤性质和作物种类等作出相应的反应，其种类及组成结构对于土壤质量和养分转化利用等起着至关重要的作用，同时也受到土壤水热等因素的影响。本研究中，垄覆地膜沟覆秸秆处理与对照相比提高了土壤微生物群落的chao1指数，而垄不覆盖沟覆秸秆处理则使其降低，这可能跟土壤含水率有关。不同垄沟集雨模式并未使土壤微生物优势物种及其组成发生太大变化，但不同程度的影响了它们的丰度。在所有处理的土壤中变形菌门为优势菌门，其次是酸杆菌门，这与Kang等[49]的研究结果相同。变形菌门是微生物群落中的重要门，它们能够利用不稳定的碳源，在富营养环境中具有较高的相对丰度，以上这些优势物种是较常见的多环芳烃类耐受及污染物[50]。此外，垄覆地膜使变形菌门的相对丰度降低，而仅沟覆秸秆则使其相对丰度增加，Yang等[51]的研究也有类似的结果，秸秆覆盖的变形菌相对丰度相对高于其他覆盖处理。酸杆菌门在土壤潮湿和地温时较少[52]。本研究结果表明各垄沟覆盖处理均能提高酸杆菌门的相对丰度。

变形菌门和放线菌门在垄不覆膜沟覆秸秆处理中占有较高的丰度。变形菌门的增长一般是利用土壤中不稳定的碳源，有学者研究发现变形菌门可参与其他微生物细胞膜和细胞壁的降解体，利用体内脂质代谢，因此，其在可溶性有机碳含量较低的土壤中依旧保留着较强的竞争优势。

表4 含水率和温度与优势菌种的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between water content and temperature and dominant strains

相关指标	变形菌门（Proteobacteria）	酸杆菌门（Acidobacteri）	芽单胞菌门（Gemmatimonadet）	拟杆菌门（Bacteroidetes）	放线菌门（Actinobacteria）
含水率	−0.600*	0.371	0.943**	−0.829**	0.086
温度	−0.143	−0.086	0.600*	−0.829**	−0.143
相关指标	浮霉菌门（Planctomycetes）	绿弯菌门（Chloroflexi）	疣微菌门（Verrucomicrobia）	厚壁菌门（Firmicutes）	己科河菌门（Rokubacteria）
含水率	0.486*	0.486*	−0.600*	−0.143	−0.314
温度	0.200	0.314	−0.086	0.200	−0.771**

注：*、**分别表示显著性相关、极显著性相关。

垄覆地膜时土壤的α多样性均高于裸土，Kang等[49]也报道覆膜处理提高了土壤微生物的丰度和多样性。地膜覆盖增强了表层土壤养分的有效性，丰富的活性有机碳和氮为细菌提供了活性底物，有利于细菌的繁殖[53]。NMDS显示垄不覆盖沟覆秸秆与平地不覆盖土壤的微生物群落结构相似，而其他处理：垄覆普通黑色地膜沟不覆盖、垄覆液态地膜沟不覆盖、垄覆液态地膜沟覆秸秆、垄覆普通黑色地膜沟覆秸秆均与对照存在明显差异。综上所述，垄沟覆盖改变了土壤微生物门水平和纲水平的组成，垄沟集雨模式可以影响土壤微生物群落的多样性。

4 结 论

（1）垄覆地膜的集雨模式（HJ、HL、YL）均可显著提高玉米产量及水分利用效率，其中垄覆普通黑色地膜沟覆秸秆模式（NJ）下产量、水分利用效率分别较传统平作不覆盖提高88.02%、79.83%；而垄无覆盖沟覆秸秆模式下玉米产量、水分利用效率均较对照低。

（2）垄覆地膜的集雨模式均能显著提高玉米根际土壤微生物群落多样性，且能改变微生物结构，但垄无覆盖沟覆秸秆的模式对土壤微生物群落多样性及微生物结构影响较小。

（3）不同垄沟覆盖集雨种植模式下，微生物群落的优势菌门依次为变形菌门（占比39.3%）、酸杆菌门（16.6%）、芽单胞菌门（15.9%）；土壤优势菌纲依次为γ-变形杆菌纲（占比25.8%）、拟杆菌纲（8.4%）、α-变形菌纲（7.7%）。

参考文献（References）

[1] 山仑, 邓西平, 康绍忠. 我国半干旱地区农业用水现状及发展方向[J]. 水利学报, 2002(9): 27-31. [Shan Lun, Deng Xiping, Kang Shaozhong. Current situation and perspective of agricultural water used in semiarid area of China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(9): 27-31.]

[2] 方彦杰, 秦安振, 雍蓓蓓. 种植模式和补灌对玉米生长发育及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2019(6): 30-34, 42. [Fang Yanjie, Qin Anzhen, Yong Beibei. Effects of planting pattern and supplemental irrigation on dryland maize growth and yield[J]. Water Saving Irrigation, 2019(6): 30-34, 42.]

[3] 胡恒觉. 揭示旱区资源生产潜力确立区域治理开发途径——评《中国北方旱区农业》[J]. 干旱地区农业研究, 1999(2): 135. [Hu Hengjue. Revealing the potential of resource production in arid regions and establishing ways of regional management and development: A review of "agriculture in arid regions of northern China"[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1999(2): 135.]

[4] 李凤民, 王静, 赵松岭. 半干旱黄土高原集水高效旱地农业的发展[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 117-122. [Li Fengmin, Wang Jing, Zhao Songling. Development of efficient dry land agriculture for water harvesting in semi-arid Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(2): 117-122.]

[5] 王凯瑜, 李援农, 方恒, 等. 覆膜集雨补灌对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(8): 718-723. [Wang Kaiyu, Li Yuannong, Fang Heng, et al. Effects of plastic-film mulching and supplementary irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(8): 718-723.]

[6] 徐悦悦, 王楹鑫, 马向成, 等. 补灌对旱作集雨下麦田微生物呼吸与熵值的影响[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 321-329, 409. [Xu Yueyue, Wang Yingxin, Ma Xiangcheng, et al. Response of wheat field microbial respiration and its entropy to different supplementary irrigation under ridge-furrow mulching system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 321-329, 409.]

[7] 李娟, 解文强, 崔婧婧, 等. 沟垄集雨系统垄宽对玉米水分和养分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2021(5): 36-40. [Li Juan, Xie Wenqiang, Cui Jingjing, et al. Effect of ridge width on maize water and nutrient use efficiency under ridge-furrow rainfall harvesting planting mode[J]. Water Saving Irrigation, 2021(5): 36-40.]

[8] 苏旺, 胡禄华, 王舰. 垄沟集雨覆盖对旱作马铃薯块茎淀粉合成关键酶活性、基因表达及淀粉累积的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(3): 737-744. [Su Wang, Hu Luhua, Wang Jian. Effects of mulching on ridge-furrow for harvesting rainwater on activity and gene expression of starch synthesis key enzyme and starch accumulation of rain-fed potato tuber[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(3): 737-744.]

[9] 李青峰, 杜文华. 陇东旱塬区不同宽度垄沟集雨种植对玉米营养生长的影响[J]. 草原与草坪, 2013, 33(4): 54-57, 62. [Li Qingfeng, Du Wenhua. Effect of the different width of ridge-furrow planting on corn growth in semi-arid areas of Longdong[J]. Grassland and Turf, 2013, 33(4): 54-57, 62.]

[10] 刘佩, 刘小利, 王金金, 等. 集雨种植模式对小麦-玉米周年农田土壤水分及作物产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6): 37-43. [Liu Pei, Liu Xiaoli, Wang Jinjin, et al. Soil moisture dynamic and crop production of a rainfed wheat-summer maize rotation system[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(6): 37-43.]

[11] Wang Q, Song X Y, Li F C, et al. Optimum ridge-furrow ratio and suitable ridge-mulching material for alfalfa production in rainwater harvesting in semi-arid regions of China[J]. Field Crops Research, 2015, 180: 186-196.

[12] 李娟, 崔婧婧. 垄沟集雨模式下垄宽对糯玉米子粒营养物质积

累和产量的影响[J]. 河北农业科学, 2021, 25(4): 26−30. [Li Juan, Cui Jingjing. Effects of ridge width on grain nutrient accumulation and yield of waxy maize under ridge-furrow rain collection mode[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2021, 25(4): 26−30.]

[13] 董宛麟, 于航, 张立祯, 等. 东北地区沟垄和地膜覆盖对土壤水分分布及利用的影响[J]. 玉米科学, 2019, 27(3): 114−121. [Dong Wanlin, Yu Hang, Zhang Lizhen, et al. Effects of ridge-furrow tillage and plastic film cover on soil moisture distribution and utilization in northeast of China[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(3): 114−121.]

[14] Zhao H, Xiong Y C, Li F M, et al. Plastic film mulch for half growing-season maximized WUE and yield of potato via moisture-temperature improvement in a semi-arid agroecosystem[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104(2): 68−78.

[15] 陆莎, 左洪超, 苗文辉, 等. 干旱区地膜覆盖玉米农田地表反照率动态参数化方法及其模拟效果分析[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 461−470. [Lu Sha, Zuo Hongchao, Miao Wenhui, et al. Dynamic parameterization and simulation of surface albedo in maize cropland mulched by plastic film in arid region[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 461−470.]

[16] 杨姗姗, 贾志宽, 张玉, 等. 集雨节灌种植方式对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(3): 97−100. [Yang Shanshan, Jia Zhikuan, Zhang Yu, et al. Effects of rainfall harvesting with water-saving irrigation cultivation on the yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(3): 97−100.]

[17] Mo F, Wang J Y, Zhou H, et al. Ridge-furrow plastic-mulching with balanced fertilization in rainfed maize (*Zea mays* L.): An adaptive management in east African Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 236: 100−112.

[18] Kolota E, Adamczewska-Sowinska K. Living mulches in vegetable crops production: Perspectives and limitations[J]. Acta Scientiarum Polonorum-Hortorum Cultus, 2013, 12(6): 127−142.

[19] Wei T, Wang L, Li Y, et al. Responses of microbial activity, abundance, and community in wheat soil after three years of heavy fertilization with manure-based compost and inorganic nitrogen[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 213: 219−227.

[20] Craig R A, Leo M C, Tim J C, et al. Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus[J]. Pedobiologia, 2011, 54: 309−320.

[21] Zhu Y, Chen Y L, Gong X F, et al. Plastic film mulching improved rhizosphere microbes and yield of rainfed spring wheat[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 263: 130−136.

[22] Chen Y X, Wen X X, Sun Y L, et al. Mulching practices altered soil bacterial community structure and improved orchard productivity and apple quality after five growing seasons[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 172: 248−257.

[23] Wang Y J, Liu L, Luo Y, et al. Mulching practices alter the bacterial-fungal community and network in favor of soil quality in a semi-arid orchard system[J]. Science of the Total Environment, 2020, 725: 138527, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138527.

[24] Farmer J, Zhang B, Jin X X, et al. Long-term effect of plastic film mulching and fertilization on bacterial communities in a brown soil revealed by high through-put sequencing[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2016, 63(2): 230−241.

[25] Liao X L, Su Z H, Liu G D, et al. Impact of soil moisture and temperature on potato production using seepage and center pivot irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2016, 165: 230 − 236.

[26] 李丽淑, 樊吴静, 杨鑫, 等. 不同栽培方式、播种深度对冬种马铃薯土壤水热及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(4): 673−679. [Li Lishu, Fan Wujing, Yang Xin, et al. Effects of different cultivation methods and sowing depth on soil water, temperature and yield of winter potato[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(4): 673−679.]

[27] 王红丽, 张绪成, 于显枫, 等. 黑色地膜覆盖的土壤水热效应及其对马铃薯产量的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5215−5226. [Wang Hongli, Zhang Xucheng, Yu Xianfeng, et al. Effect of using black plastic film as mulch on soil temperature and moisture and potato yield[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): 5215−5226.]

[28] 李荣, 王艳丽, 吴鹏年, 等. 宁南旱区沟垄覆盖改善土壤水热状况提高马铃薯产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 168−175. [Li Rong, Wang Yanli, Wu Pengnian, et al. Ridge and furrow mulching improving soil water-temperature condition and increasing potato yield in dry-farming areas of south Ningxia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 168−175.]

[29] 曹刚, 毕淑海, 赵明新, 等. 干旱区梨园不同覆盖条件下土壤环境因子综合性评价研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 890−900. [Cao Gang, Bi Shuhai, Zhao Mingxin, et al. Comprehensive evaluation of soil environmental factors under differen mulching conditions in pear orchard in arid region[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 890−900.]

[30] 付鑫, 王俊, 张祺, 等. 秸秆和地膜覆盖对渭北旱作玉米农田土壤氮组分与产量的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6912−6920. [Fu Xin, Wang Jun, Zhang Qi, et al. Effects of straw and plastic film mulching on soil nitrogen fractions and corn yield in the Weibei rainfed highland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): 6912−6920.]

[31] Zhang K P, Xing Y, Wang G Y, et al. Ridge-furrow with film mulching practice ameliorates soil microbial metabolic activity and carbon utilization in rhizosphere soil of rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(6): 2764−2776.

[32] 包开花, 蒙美莲, 陈有君, 等. 覆膜方式和保水剂对旱作马铃薯光合特性及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(3): 139−143, 159. [Bao Kaihua, Meng Meilian, Chen Youjun, et al. Effects of plastic film mulching patterns and water retaining agent on photosynthetic characteristics and yield of rainfed potato[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(3): 139−143, 159.]

[33] 纪晓玲, 张雄, 张静, 等. 不同覆盖方式对马铃薯光合特性及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(6): 819−825. [Ji Xiaoling, Zhang Xiong, Zhang Jing, et al. Effects of different mulching methods on photosynthetic characteristics and yield in potato[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2018, 27(6): 819−825.]

[34] 陈玉章, 田慧慧, 李亚伟, 等. 秸秆带状沟覆垄播对旱地马铃薯产量和水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(5): 714−727. [Chen Yuzhang, Tian Huihui, Li Yawei, et al. Effects of straw strip mulching on furrows and planting in ridges on water use efficiency and tuber yield in dryland potato[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(5): 714−727.]

[35] Yang K J, Wang F X, Shock C C, et al. Potato performance as influenced by the proportion of wetted soil volume and nitrogen under drip irrigation with plastic mulch[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 260−270.

[36] 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 等. 模拟及实际根系分泌物对芘污染土壤微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 1077−1088. [Han Boyuan, Zhang Wen, Hu Fangyu, et al. Influence of artificial root exudates and actual root exudates on the microbial community in pyrene-contaminated soil[J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 1077−1088.]

[37] 邓莹莲, 赵长林. 基于高通量测序分析云南大理剑川羊肚菌土壤细菌群落结构及多样性[J]. 中国农学通报, 2023, 39(10): 79−87. [Deng Yinglian, Zhao Changlin. Soil bacterial community structure and diversity of morchella in Jianchuan of Dali in Yunnan Province based on high-throughput sequencing[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(10): 79−87.]

[38] 刁体伟, 陈晓姣, 魏鑫, 等. 基于可培养法与高通量测序对大头菜致腐菌筛选及细菌结构分析[J]. 中国调味品, 2022, 47(6): 44−49, 60. [Diao Tiwei, Chen Xiaojiao, Wei Xin, et al. Screening and bacterial structure analysis of spoilage bacteria in kohlrabi based on culturable method and high-throughput sequencing[J]. China Condiment, 2022, 47(6): 44−49, 60.]

[39] 屈平平, 李涛, 杨明彩, 等. 合生素对断奶新西兰肉兔生长性能及盲肠微生物菌群结构的影响[J]. 饲料研究, 2022, 45(16): 70−77. [Qu Pingping, Li Tao, Yang Mingcai, et al. Effect of synbiotics on growth performance and cecal microbial flora structure of weaned New Zealand meat rabbits[J]. Feed Research, 2022, 45(16): 70−77.]

[40] 胡敏, 苗庆丰, 史海滨, 等. 不同类型地膜覆盖对土壤水热及春玉米产量的影响[J]. 土壤, 2018, 50(3): 628−632. [Hu Min, Miao Qingfeng, Shi Haibin, et al. Mulching effects of different films on soil water, heat and yield of spri maize[J]. Soil, 2018, 50(3): 628−632.]

[41] 李畅. 基于肠道菌群特异性表型探讨启宫丸方对多囊卵巢综合征痰湿证患者的干预作用研究[D]. 济南:山东中医药大学, 2020. [Li Chang. study on the intervention effect of Qi Gong Wan in patients with phlegm-dampness syndrome of polycystic ovary syndrome based on intestinal flora-specificphenotype[D]. Jinan: Shandong University of Traditional Chinese Medicine, 2020.]

[42] 张杰, 程伟, 李娜, 等. 夏秋茶大曲与传统中温大曲中微生物群落及多样性研究[J]. 酿酒科技, 2021(11): 36−44. [Zhang Jie, Cheng Wei, Li Na, et al. Microbial community and diversity of summer-autumn tea Daqu and traditional medium-temperature Daqu[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2021(11): 36−44.]

[43] Zhao Y, Mao X M, Shukla M K, et al. Modeling soil water-heat dynamic changes in seed-maize fields under film mulching and deficit irrigation conditions[J]. Water, 2020, 12(5): 1330−1353.

[44] Dong Q, Dang T H, Guo S L, et al. Effect of different mulching measures on nitrate nitrogen leaching in spring maize planting system in south of Loess Plateau[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 654−658.

[45] 余舜尧, 江新凤, 李琛, 等. 覆盖对茶园土壤温度和杂草生长的影响[J]. 江西农业学报, 2021, 33(11): 78−82, 90. [Yu Shunyao, Jiang Xinfeng, Li Shen, et al. Effects of different mulching materials on soil temperature and weed growth in tea gardens[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2021, 33(11): 78−82, 90.]

[46] 王锐. 地膜覆盖对夏玉米农田水分转化过程及利用效率的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023. [Wang Rui. Effects of plastic film mulching on water transformation and utilization efficiency of summer maize[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2023.]

[47] 康恩祥, 何宝林, 刘晓伟, 等. 不同粒径砂砾石覆盖对砂田西瓜土壤微生物和酶活性的影响[J]. 长江蔬菜, 2011(24): 52−54. [Kang Enxiang, He Baolin, Liu Xiaowei, et al. Variation of microbial biomass and enzyme activities in gravel-sand mulching soil with different particle sizes of watermelon field[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2011(24): 52−54.]

[48] 吴宏亮, 许强, 陈阜, 等. 不同覆盖措施对旱区农田土壤酶活性及西瓜产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 173−178. [Wu Hongliang, Xu Qiang, Chen Fu, et al. Effect of different mulching methods on soil enzyme activity and watermelon production in farmland of arid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(3): 173−178.]

[49] Kang Y C, Liu Y, Qin S H, et al. Ridge-mulch tillage and rotation with broad bean affect soil microbial community, diversity and crop yield in a long-term potato continuous cropping field[J]. Soil Use and Management, 2021, 37: 677−688.

[50] 冯琦. PAHs污染对农田土壤微生物群落组成的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2019. [Feng Qi. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollution on microbial community composition in farmland[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.]

[51] Yang Y, Tong Y N, Chadwick D, et al. Different techniques for high-throughput amplicon sequencing of the soil bacterial community structure after spring maize cultivation[J]. Soil Use and Management, 2021, 37(4): 855−865.

[52] Christian L L, Kelly S R, Zach A, et al. Temporal variability in soil microbial communities across land-use types[J]. The ISME Journal, 2013, 7(8): 1641−1650.

[53] Ai C, Zhang S Q, Zhang X, et al. Distinct responses of soil bacterial and fungal communities to changes in fertilization regime and crop rotation[J]. Geoderma, 2018, 319: 156−166.

Effects of ridge mulching and rain harvesting patterns on microbial diversity in maize rhizosphere soil

GAO Yanting[1], ZHANG Rui[1], DONG Bo[2], LI Qingqing[1], LIU Kehan[1]

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: This study used Dengyi No. 2 maize as the experimental material to assess the effects of furrow cover rainfall collection mode on the microbial community structure and diversity of maize rhizosphere soil. A single-factor completely-randomized experimental design was adopted, and conventional plain planting without mulching was used as the control (CK). Soil microbial community composition and diversity were analyzed using Illumina high-flux sequencing technology. Six treatments comprising ridges covered with the following were set: ordinary black mulch (HL), liquid mulch (YL), straw (NJ), liquid mulch (YJ), and ordinary black mulch (HJ). The results showed that: (1) The rain-harvesting mode of ridge and furrow mulching was beneficial in increasing corn yield and water use efficiency. Among the six treatments, the number of rows per ear, 1000-grain weight, yield, and water use efficiency of treated HJ were the highest: 11.22%, 31.31%, 88.02%, and 79.83% higher than that of control CK, respectively. There were significant differences between the NJ treatment and CK ($P<0.05$); however, the yield and water use efficiency of NJ treatment were lower than those of the CK treatment. (2) Each treatment of ridge and furrow mulching except for NJ significantly increased microbial community diversity and changed the microbial structure. (3) The microbial community composition of each treatment was affected by the precipitation harvesting mode at the phyla and class levels. The main bacterial phyla in the soil microbial community were discovered to be Proteobacteria, Acidobacteria, Gemmatimonadetes, and Bacteroidetes. The main dominant Bacteroidia were Gammaproteobacteria (25.8%), Bacteroidia (8.4%), and Alphaproteobacteria (7.7%). Therefore, ridge mulching can improve soil microbial richness, diversity, and evenness index. In other words, the corrugation and rain-harvesting modes can change the structure and composition of the soil microbial at the phyla and class levels to increase corn yield.

Key words: furrow cover rainfall collection; maize; soil microbial community; cover